

Eksperymentalne badania układów kilku nukleonów

Angelina Łobejko¹

for the BINA Collaboration^{2,3,4,5,6,7}

- 1) Institute of Experimental Physics, University of Gdańsk
- 2) Institute of Physics, University of Silesia
- 3) Institute of Nuclear Physics, PAN, Kraków
- 4) Institute of Physics, Jagiellonian University, Kraków
- 5) Faculty of Physics, University of Warsaw, Warsaw
- 6) University of Groningen, The Netherlands
- 7) Tata Institute of Fundamental Research, TIFR Mumbai, India
- 8) Tohoku University, Sendai, Japan

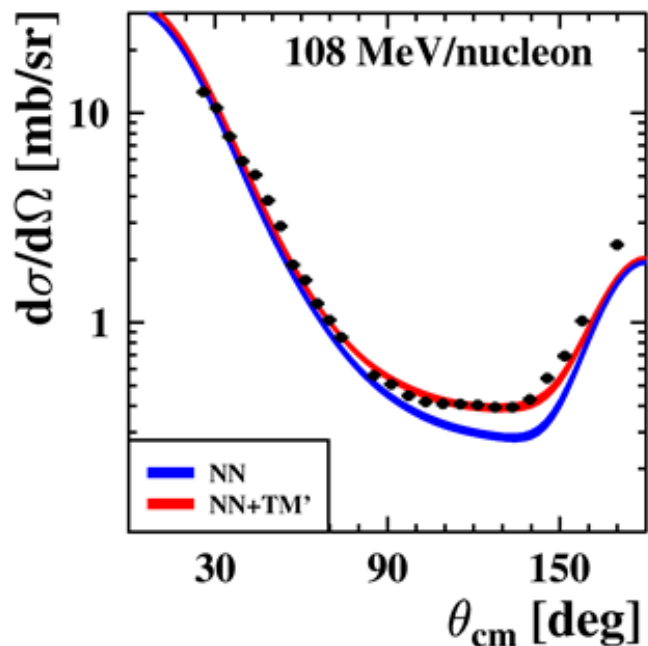


Polskie Towarzystwo Fizyczne
Sekcja Fizyki Jądrowej



**University
of Gdańsk**

Układ Trzech Nukleonów (3N)



➤ Przewidywanie potencjałów NN:

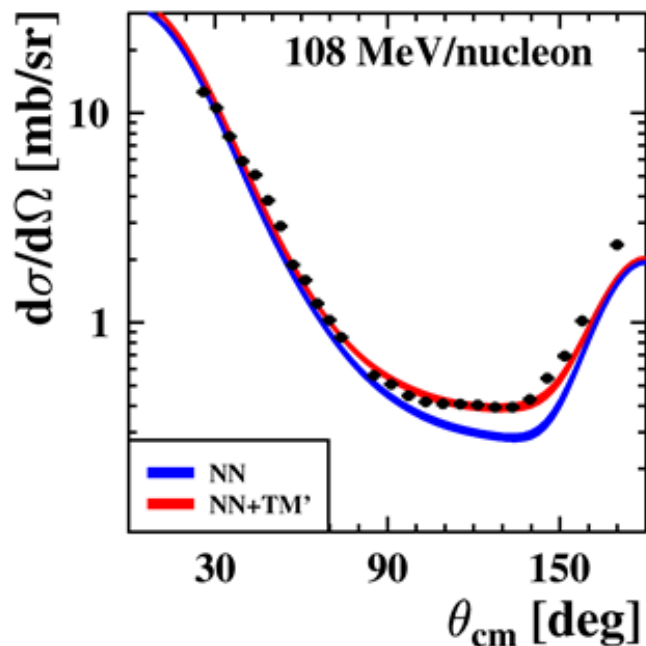
- **Bardzo dobrze opisują** dane eksperymentalne rozprożeń elastycznych dla **układu 2N**;
- **Nie odtwarzają** w sposób prawidłowy **energii wiązania ^3H** oraz ^3He , a także cięższych układów;
- **Nie odtwarzają** minimum przekroju czynnego **rozpraszania elastycznego $d(\text{N},\text{N})d$** ;

➤ **Wprowadzenie siły trójnukleonowej (3NF)** jako konceptu **dodatkowej dynamiki** związanej z obecnością trzeciego nukleonu

➤ W **ChEFT** siła 3N pojawia się **naturalnie**

	^3H	^3He	^4He
Experiment	8.48	7.72	28.3
CD Bonn	8.01	7.29	26.3
Av18	7.62	6.92	24.3
CD Bonn + TM99	8.48	7.73	29.2

Układ Trzech Nukleonów (3N)



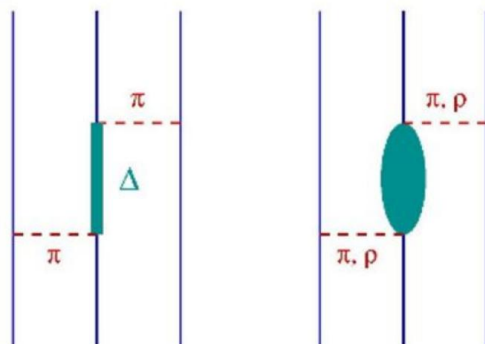
➤ Przewidywanie potencjałów NN:

- **Bardzo dobrze opisują** dane eksperymentalne rozprożeń elastycznych dla **układu 2N**;
- **Nie odtwarzają** w sposób prawidłowy **energii wiązania ^3H** oraz ^3He , a także cięższych układów;
- **Nie odtwarzają** minimum przekroju czynnego **rozpraszania elastycznego $d(N,N)d$** ;

➤ **Wprowadzenie siły trójnukleonowej (3NF)** jako konceptu **dodatkowej dynamiki** związanej z obecnością trzeciego nukleonu

➤ W **ChEFT** siła 3N pojawia się **naturalnie**

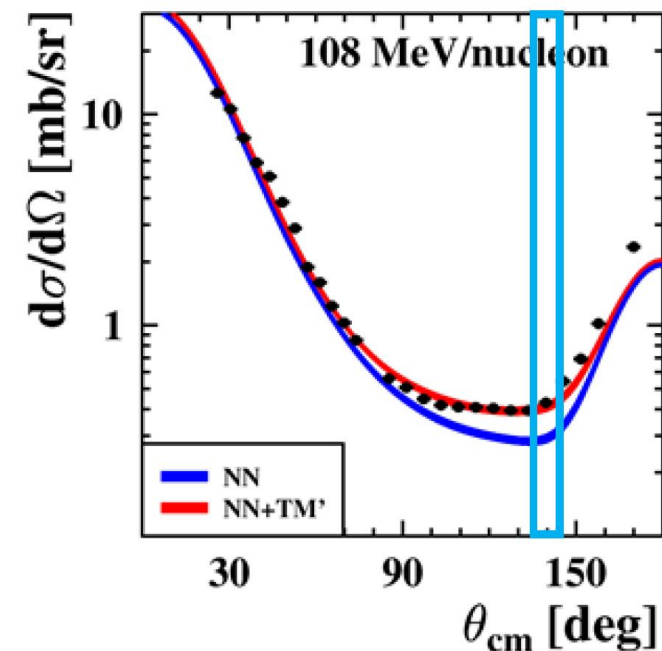
Modele 3NF



	2NF	3NF	4NF
LO	$\times$ H	—	—
NLO	$\times$ H $\times$ H $\times$ H $\times$ H	—	—
N2LO	H $\times$ H	H $\times$ H $\times$ H	—
N3LO	$\times$ H $\times$ H $\times$ H $\times$ H ...	H $\times$ H $\times$ H $\times$ H ...	H $\times$ H $\times$ H $\times$ H ...
N4LO	$\times$ H $\times$ H $\times$ H $\times$ H ...	H $\times$ H $\times$ H $\times$ H ...	H $\times$ H $\times$ H $\times$ H ...

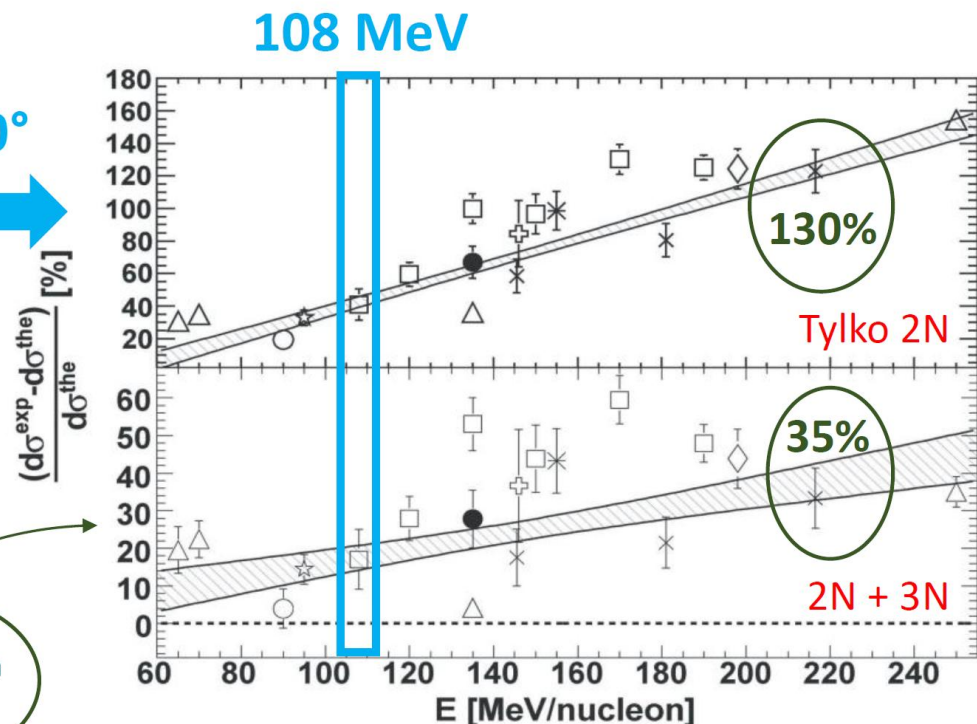
W PRZYGOTOWANIU

Motywacja



$\theta_{cm} = 140^\circ$

3x mniejsza skala



- Przy pośrednich energiach **elastyczne rozpraszanie** proton-deuteron **wykazuje znaczną wrażliwość na efekty 3NF**;
- Obliczenia oparte tylko na **oddziaływaniu 2N nie odwzorowują danych** eksperymentalnych przy kątach wstecznych ($\theta_{cm} = 140^\circ$);
- Reakcja **rozbitia deuteronu** - stan końcowy **trzech ciał bogaty w konfiguracje** kinematyczne wykazujące **różnorodną czułość na poszczególne elementy dynamiki**;

Układy 3N – co możemy badać eksperymentalnie?

➤ Procesy:

- Rozpraszanie sprężyste: $N + d \rightarrow N + d$
- **Reakcja breakup'u (rozbitcia deuteronu): $N + d \rightarrow N + n + p$**
- Procesy elektromagnetyczne

➤ Obserwable:

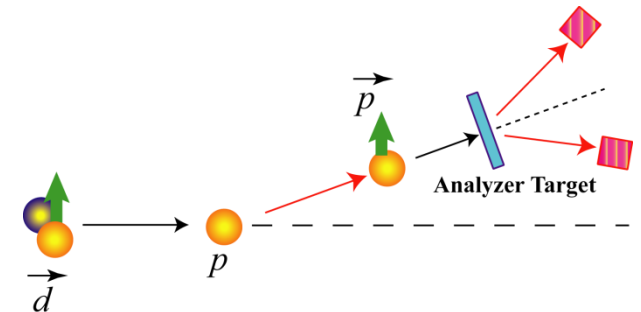
- Różniczkowy przekrój czynny
- Wektorowe i tensorowe zdolności analizujące
- Współczynniki transferu polaryzacji, korelacje

➤ Zasięg energetyczny – dlaczego „pośrednie” energie?

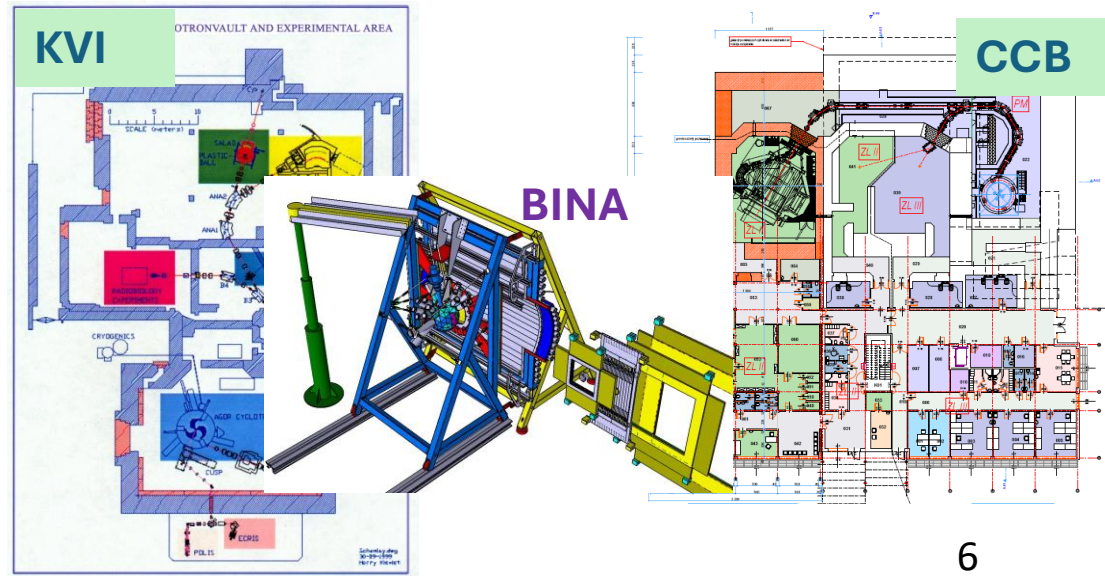
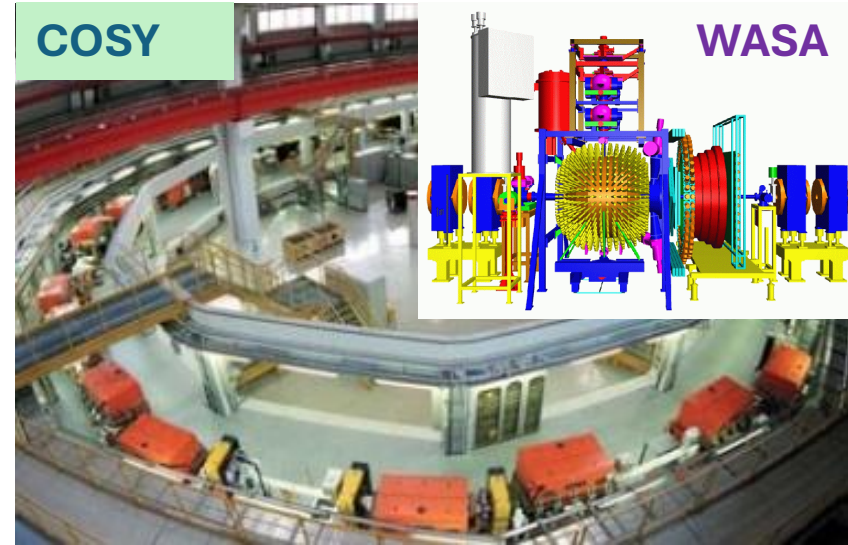
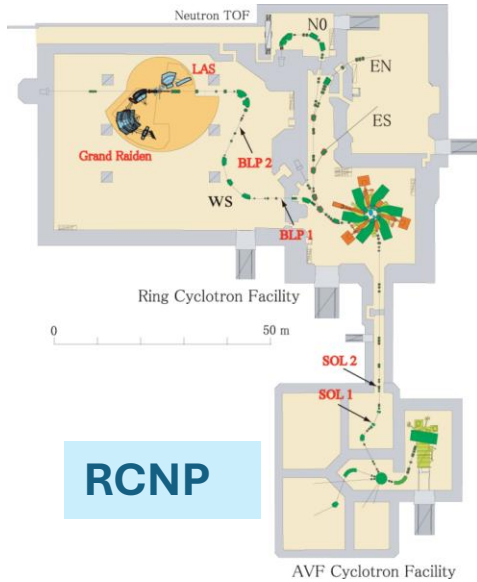
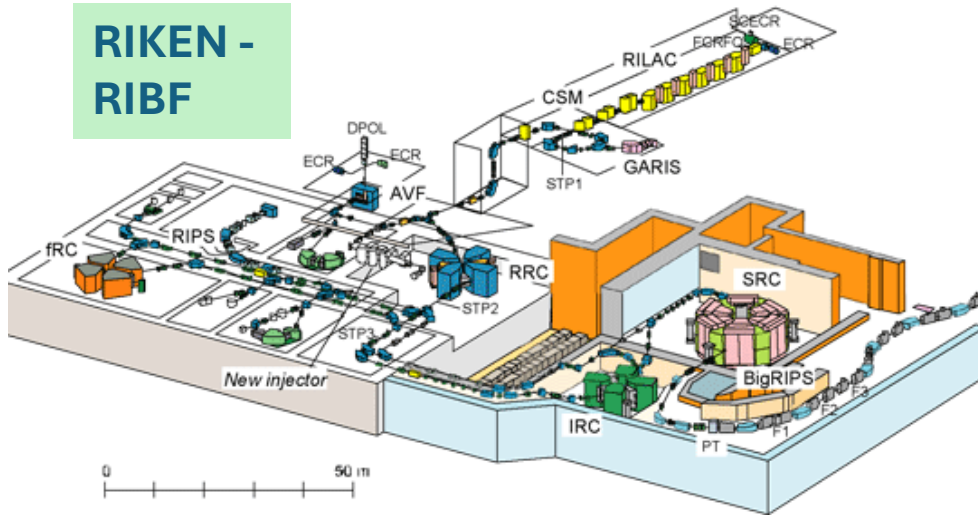
- Poniżej progu na produkcję pionu – precyzyjne obliczenia do porównania
- Mierzalne efekty 3NF

➤ Techniki detekcji:

- **Detektory o dużej akceptancji kątowej**
- Spektrometry magnetyczne

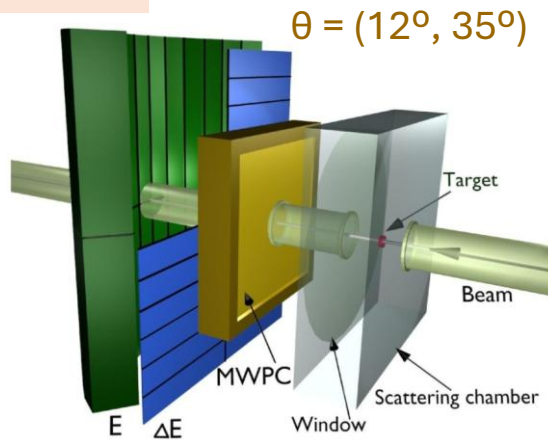


Experimental Facilities



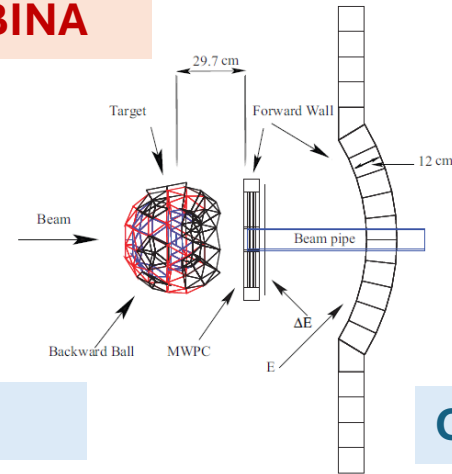
Detektory o dużej akceptancji w badaniach kilku nukleonów

SALAD



KVI-Groningen

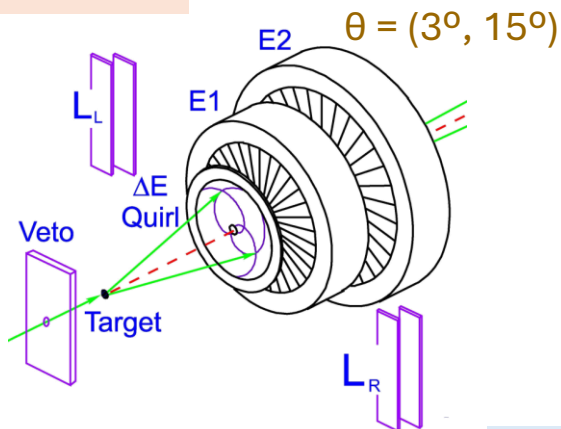
BINA



$$\theta_{\text{Wall}} = (12^\circ, 35^\circ)$$
$$\theta_{\text{Ball}} = (40^\circ, 180^\circ)$$

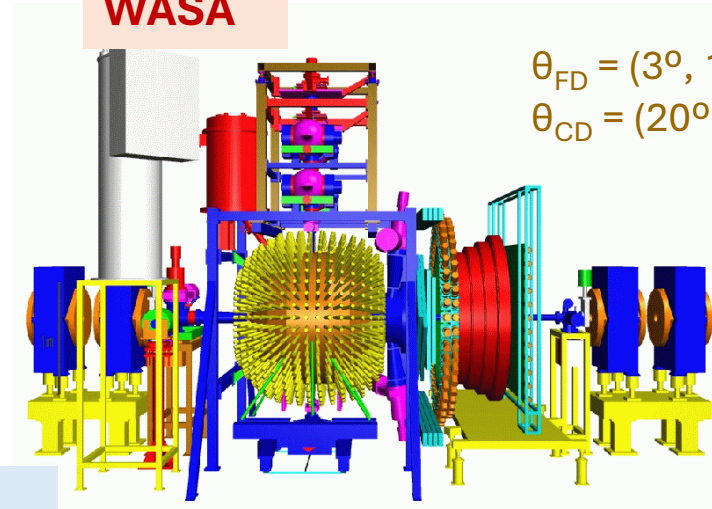
CCB Kraków

GeWall



COSY-Juelich

WASA



$$\theta_{\text{FD}} = (3^\circ, 180^\circ)$$
$$\theta_{\text{CD}} = (20^\circ, 169^\circ)$$

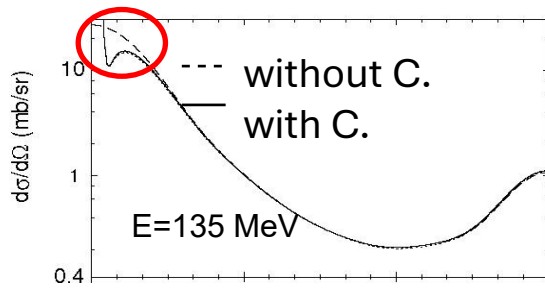
Układy 3N – Rozpraszanie sprężyste

Różniczkowe przekroje czynne

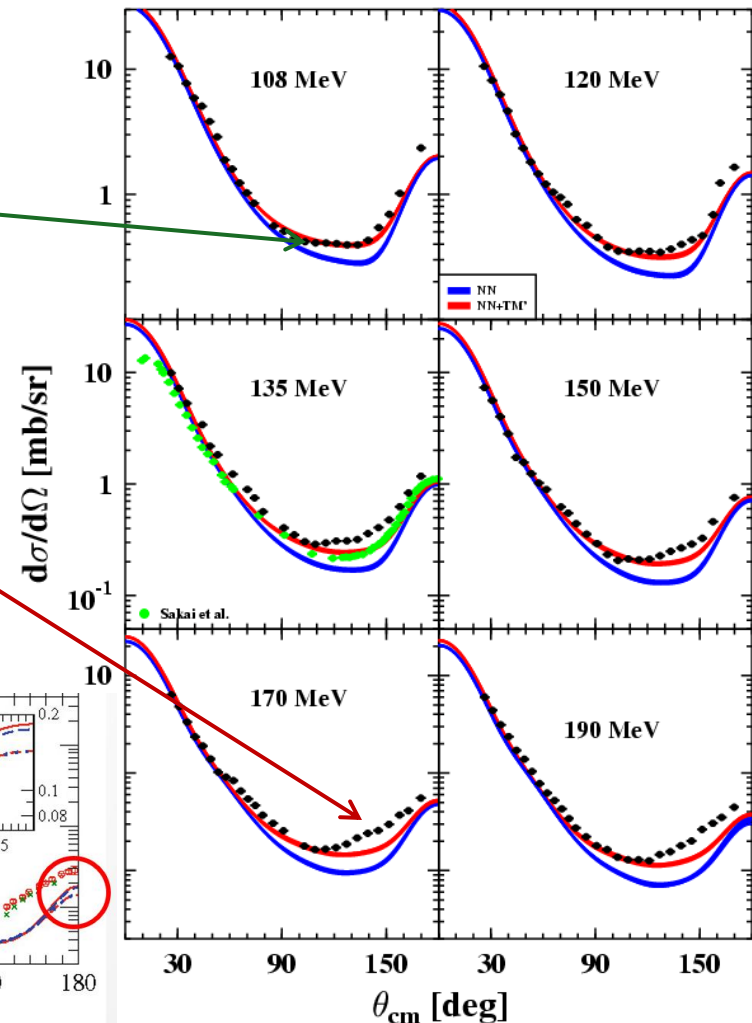
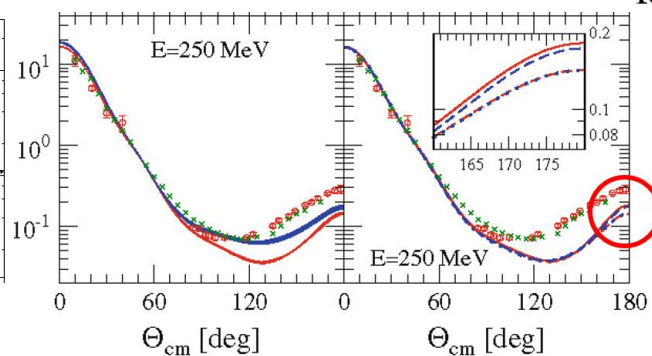
- ✓ Bogaty zbiór danych (RIKEN/RCNP/IUCF/KVI)
- ✓ 3NF pomaga

✗ przy wyższych energiach pojawiają się rozbieżności – problem z modelami 3NF

Oddziaływanie kulombowskie?



Efekty relatywistyczne?

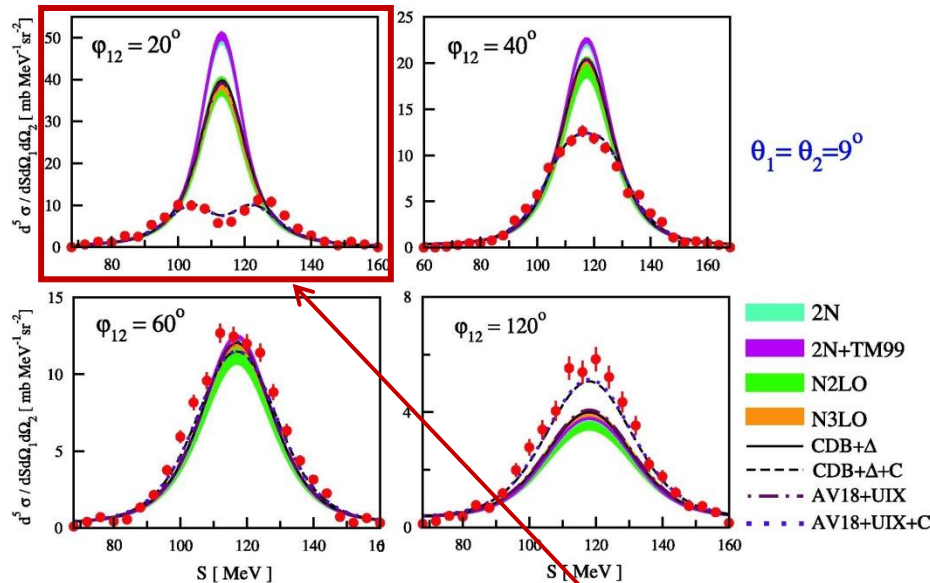


Niewielki wpływ i tylko dla skrajnych kątów!

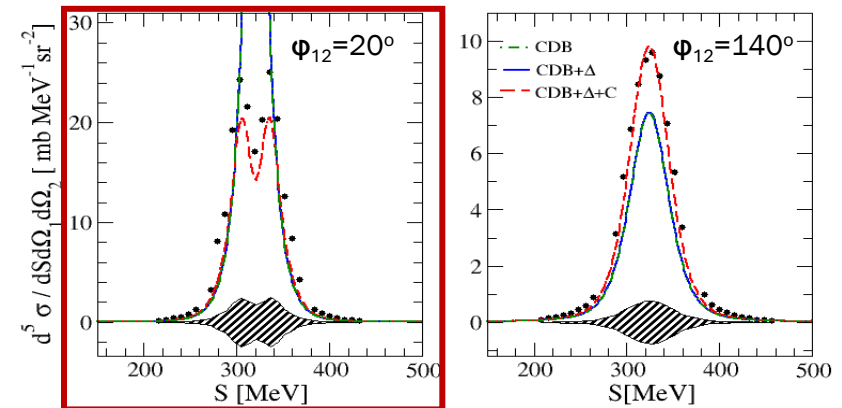
Układy 3N – Reakcja Breakup'u $^1\text{H}(d,pp)n$

Różniczkowe przekroje czynne

65 MeV/nucleon



170 MeV/nucleon



GeWall@COSY, I.Ciepał et al. Few Body Syst. 56,665 (2015)

WASA@COSY, B. Kłos et al. , Phys. Rev C 101 , 044001 (2020)

Obliczenia:

A.Deltuva et al., Phys. Rev. C80, 064002, (2009)

Obliczenia:

H. Witała et al., Phys. Rev. C83, 044001, (2011)

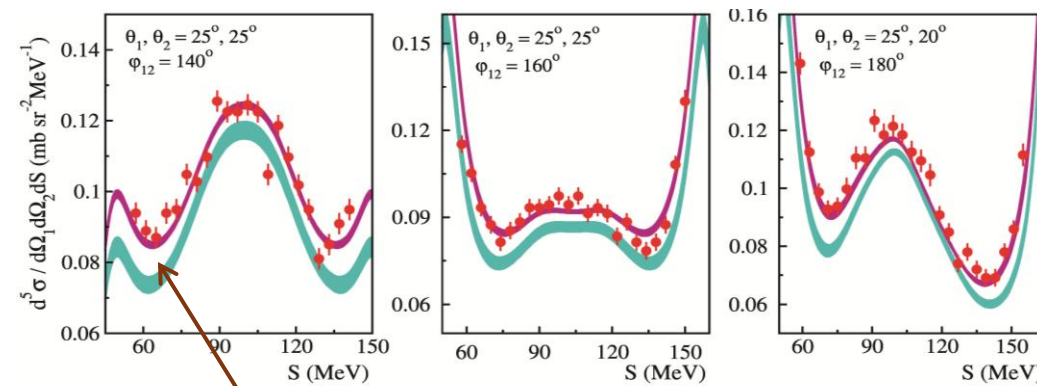
Wyraźne efekty kulombowskie przy p-p FSI w szerokim zakresie energii wiązki

Układy 3N – Reakcja Breakup'u $^1\text{H}(d,pp)n$

Różniczkowe przekroje czynne

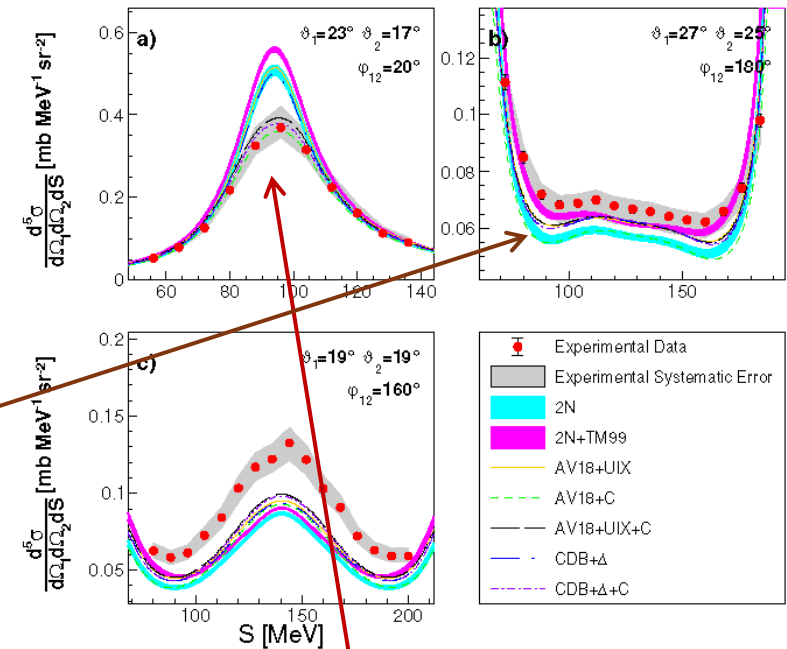
65 MeV/nucleon

80 MeV/nucleon $(\theta < 30^\circ)$



SALAD@KVI, St.Kistryn et al., Phys. Rev C 72 , 044006 (2005)

3NF znacznie poprawia opis
różniczkowego przekroju czynnego
(efekty obserwowane w wybranych
konfiguracjach kinematycznych)



BINA@KVI, W. Parol et al., Phys. Rev C 102 , 054002 (2020)

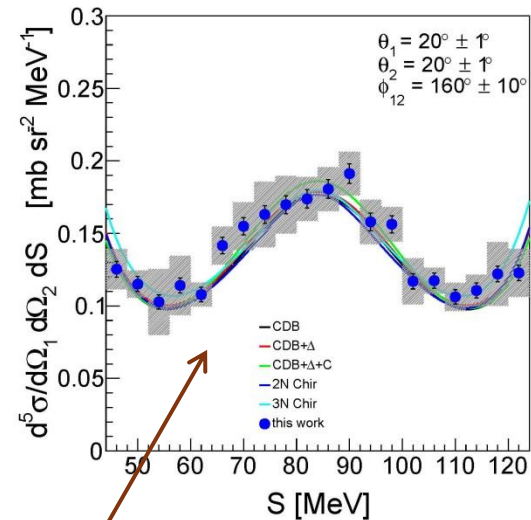
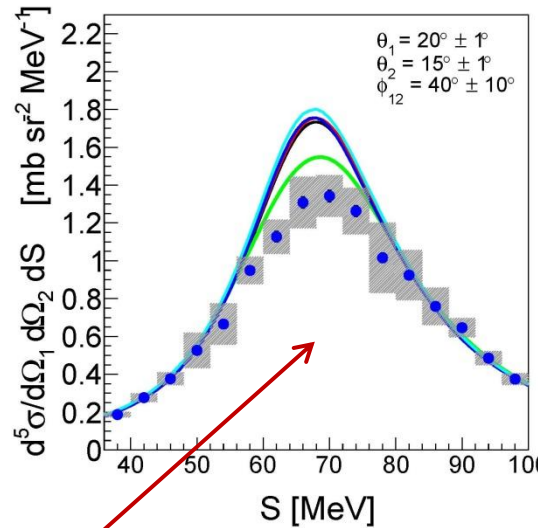
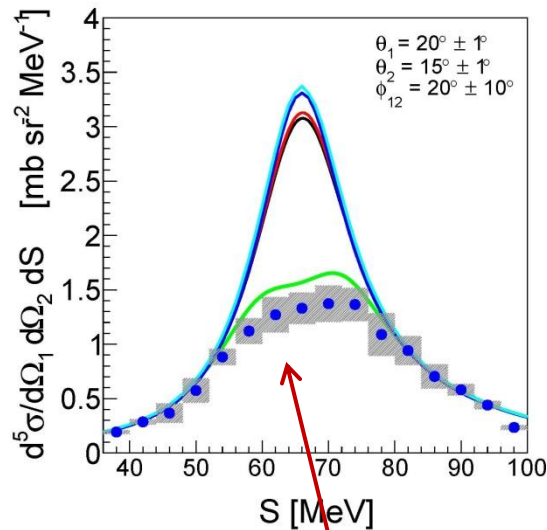
Efekty kulombowskie

Układy 3N – Reakcja Breakup'u $^1\text{H}(d,pp)n$

Różniczkowe przekroje czynne

($\theta < 25^\circ$)

80 MeV/nucleon



BINA@KVI, I. Skwira et al., Few-Body Syst 65 (2024)

- Rozpraszanie sprężyste $^1\text{H}(d,dp)$ – potwierdzono **niewielki efekt 3NF**;
- Obecne **Efekty kulombowskie** ;
- W obszarach, w których efekty kulombowskie są zaniedbywalne, opis teoretyczny **potencjałów realistycznych i ChEFT (SMS N4LO+ +N2LO 3NF) jest bardzo dobry**;

Energia [MeV/nuc]	Detektor @ Laboratorium	Zakres kątowy	Reakcja	Obserwable ~ 1000 punktów eksperymentalnych Dla obserwabli	
50	BINA @ KVI	4π Wall: 12° - 35°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	$A_x^{\text{d}}, A_y^{\text{d}}, A_{xy}, A_{xx}, A_{yy}$
65	SALAD @ KVI	12° - 35°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	$A_x^{\text{d}}, A_y^{\text{d}}, A_{xy}, A_{xx}, A_{yy}$
	GeWall @ FZ-Juelich	5° - 13°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	$A_x^{\text{d}}, A_y^{\text{d}}$
80	BINA @ KVI	4π Wall: 12° - 35°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	
			$^1\text{H}(\text{d},\text{pn})\text{p}$	σ	
108	BINA @ CCB	4π Wal: 12° - 35°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	
135, 195	BINA @ KVI	4π	$^2\text{H}(\text{p},\text{pp})\text{n}$	σ	A_x, A_y
150	WASA@ FZ-Juelich	4π	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	
160	BINA @ CCB	4π	$^2\text{H}(\text{p},\text{pp})\text{n}$	σ	
170, 190, 200	WASA@ FZ-Juelich	4π FD: 5° - 13°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	

- Jak dotąd nie przeprowadzono żadnych obliczeń uwzględniających zarówno **3NF+Coulomb+podejście relatywistyczne**;
- Duża przestrzeń fazowa – można skorzystać z selektywności;
- Systematyczne badania nad energią mogą pomóc w wyjaśnieniu różnych efektów.

Badanie układu 3N BINA@CCB

BINA – Big Instrument for Nuclear-Polarization Analysis

➤ Program eksperymentalny:

- Pomiar rozpraszania elastycznego $^2\text{H}(\text{p},\text{pd})$ dla **108, 135** oraz **160 MeV**;
- Pomiar reakcji rozbitcia deuteronu $^2\text{H}(\text{p},\text{pp})\text{n}$ dla energii **108** oraz **160 MeV**;

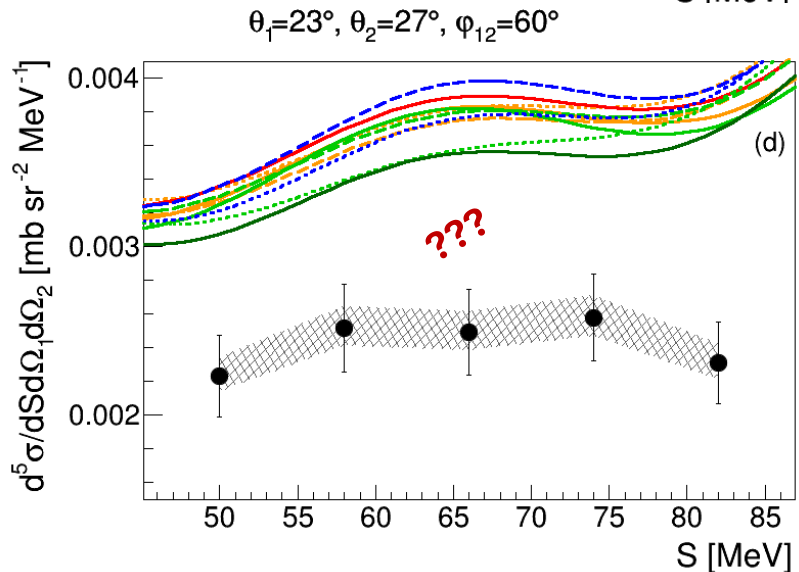
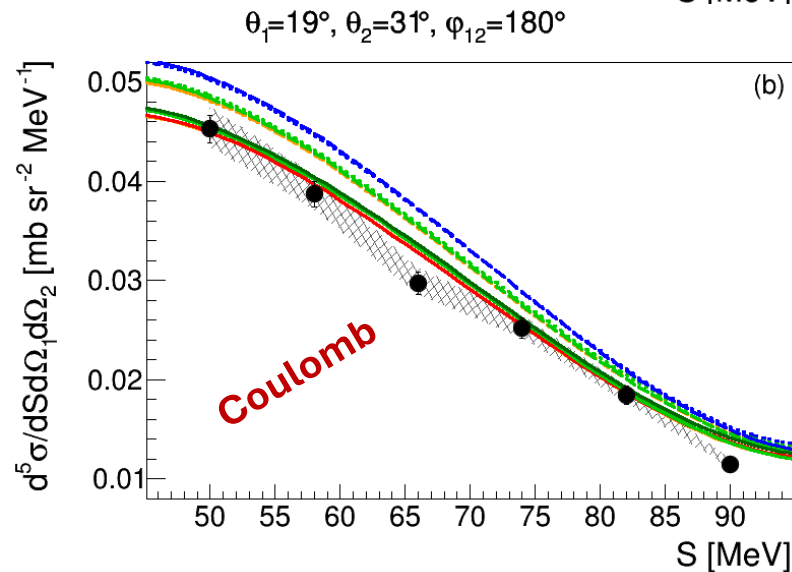
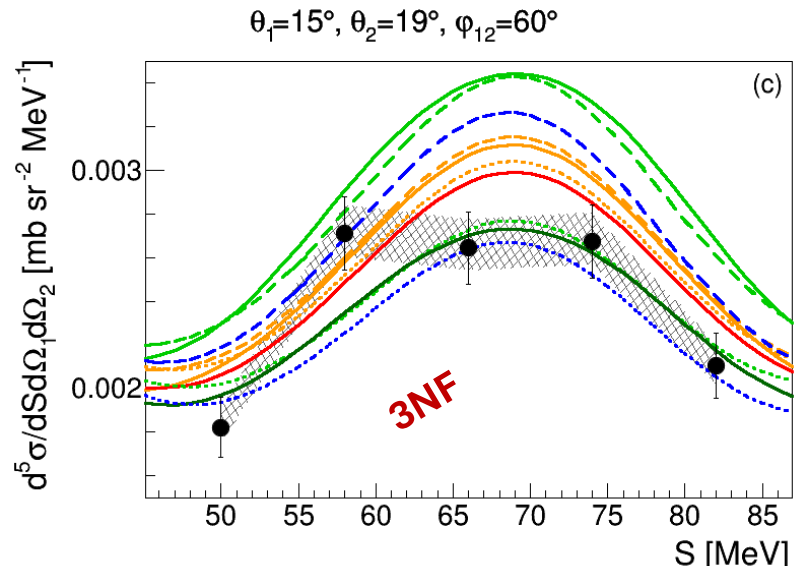
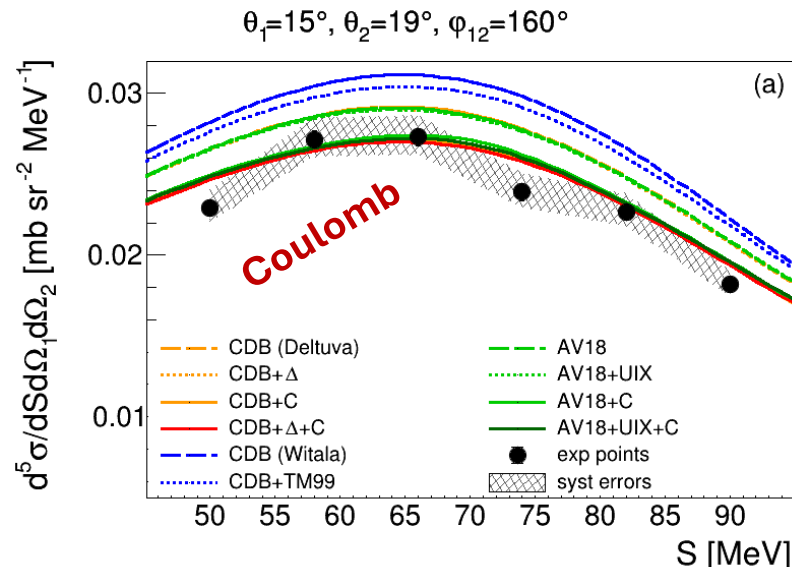
➤ Cele:

- Badanie **3NF**;
- Weryfikacja przewidywanych efektów – **kulombowskiego**, a także **relatywistycznych**;
- Testowanie **obliczeń ChEFT**;

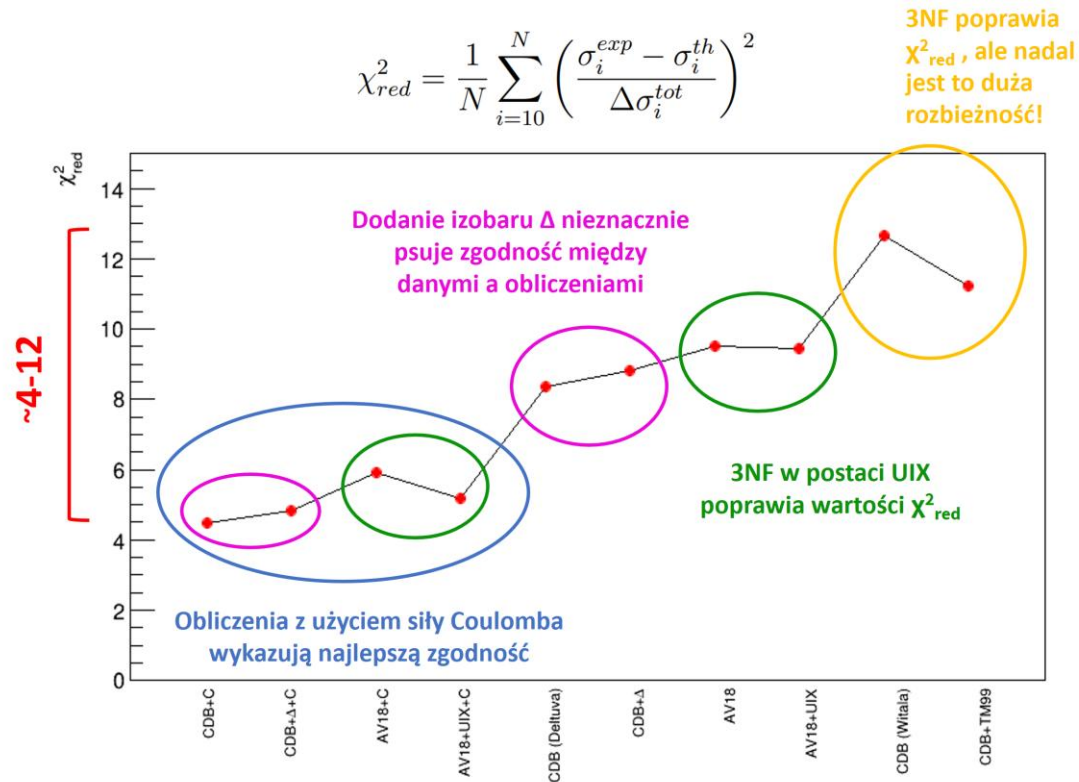
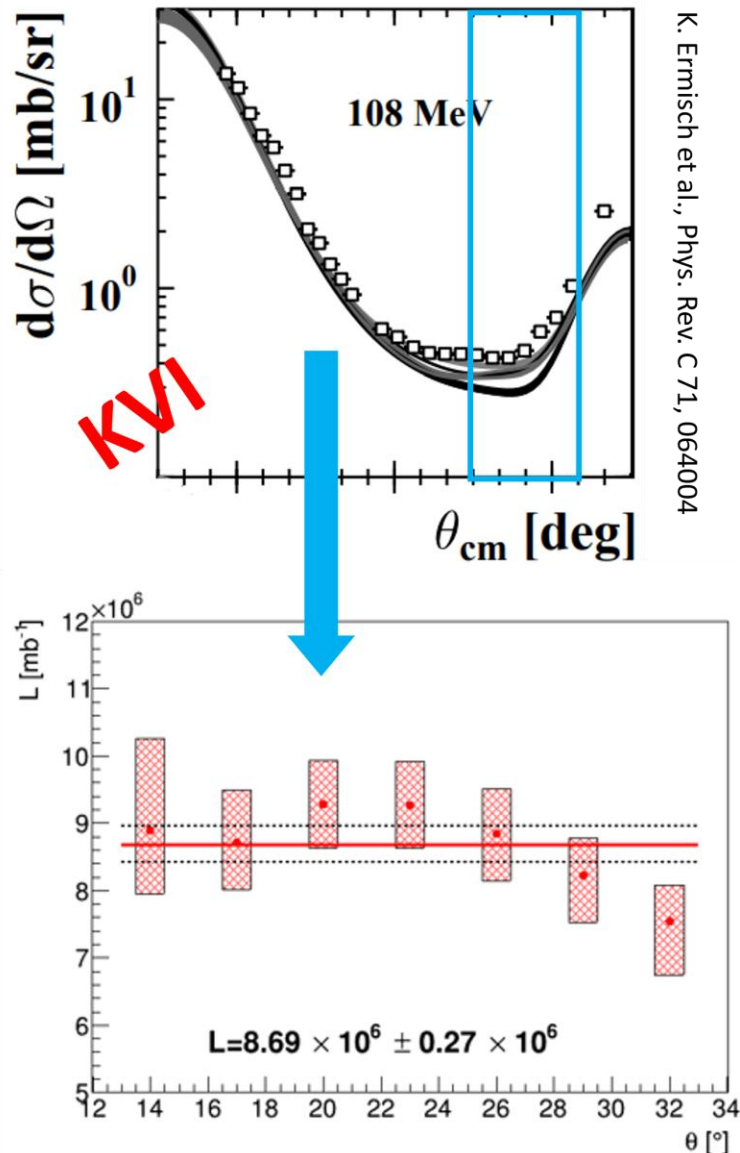


Pierwszy pomiar eksperymentalny po zainstalowaniu BINA w CCB!

Wyniki – Reakcja Breakup'u $^2\text{H}(p,pp)n$



Wyniki – Reakcja Breakup'u $^2\text{H}(p,pp)n$

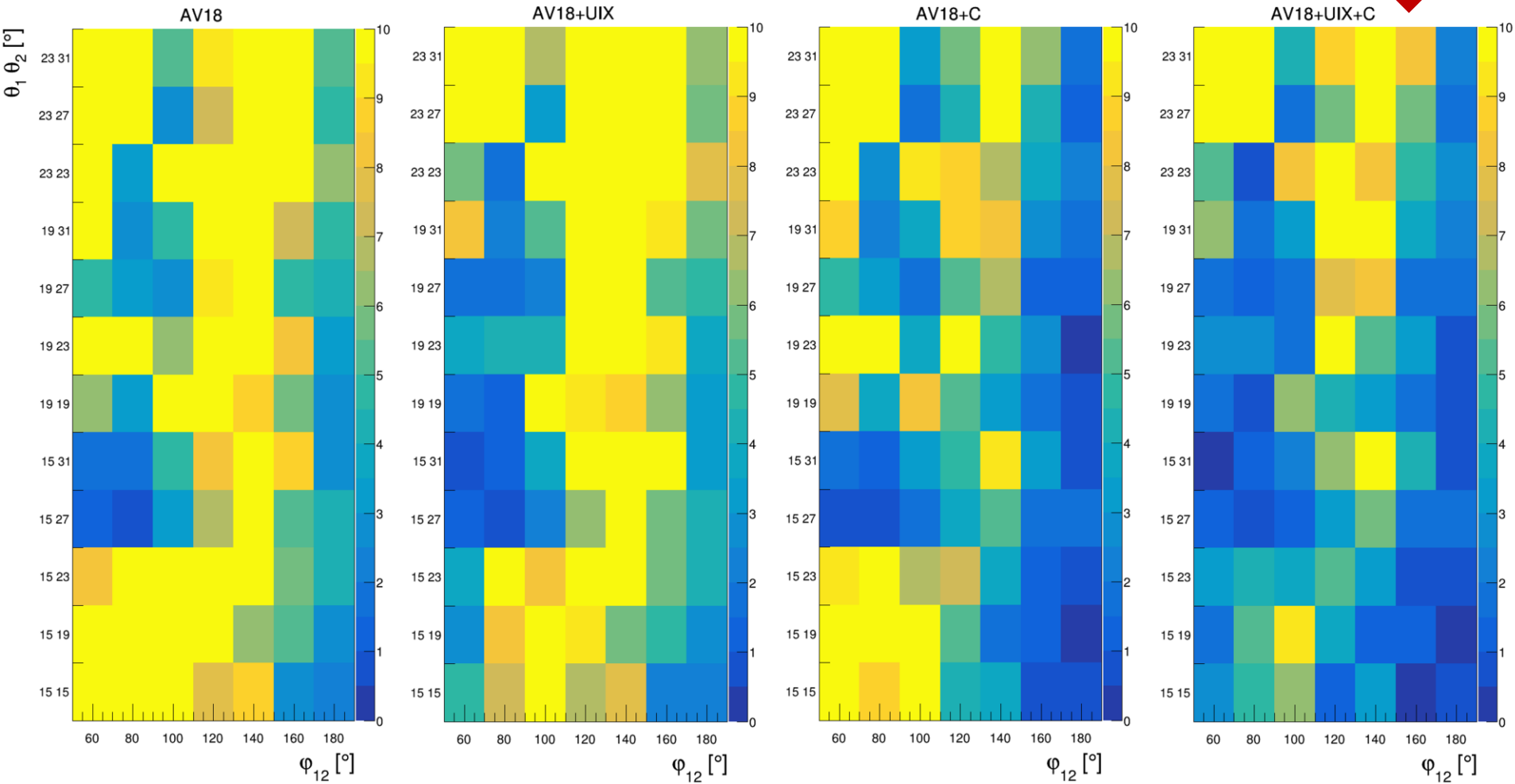


- Globalne wyniki χ^2_{red} silnie zależą od **modelu teoretycznego**;
- Obliczenia z **siłą Coulomba** mają **najlepszą zgodność**;
- **Efekt 3NF** wprowadzony w **postaci izobaru Δ** jest **znikomy**;
- **Modele 3NF: TM99** oraz **UIX** wprowadzają efekty, które są bardziej znaczące;

Wyniki – Reakcja Breakup'u $^2\text{H}(p,pp)n$

➤ Ogromna rozbieżność między danymi eksperymentalnymi, a obliczeniami teoretycznymi;

➤ Najlepszy opis dają obliczenia uwzględniające zarówno 3NF, jak i oddziaływania kulombowskie



Reakcje breakup'u – podsumowanie:

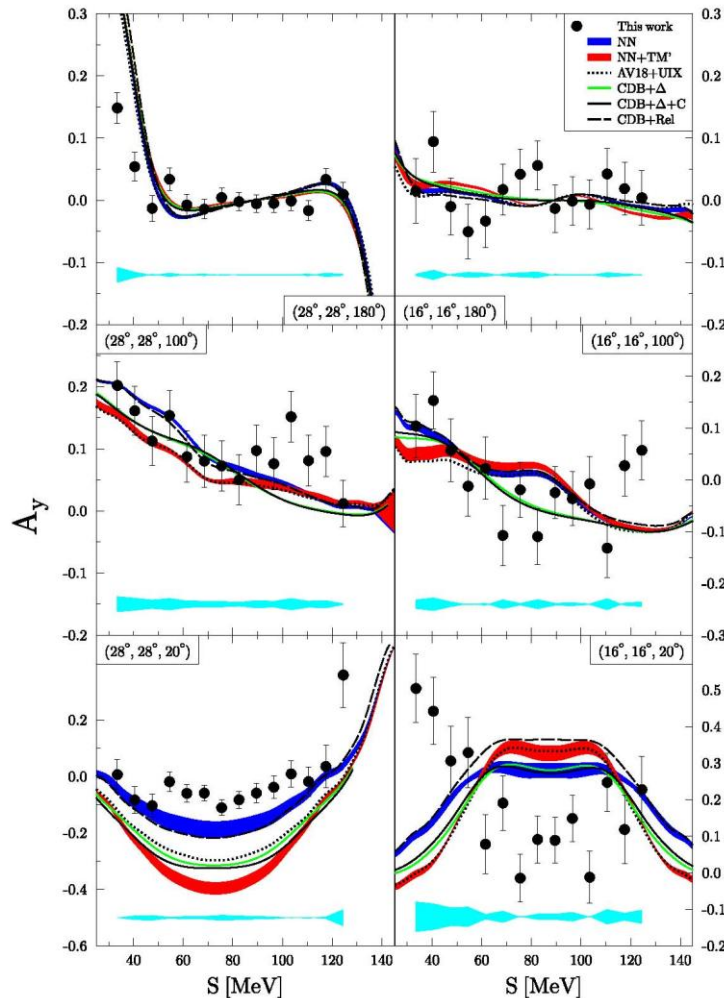
Różniczkowe przekroje czynne

- **3NF znacznie poprawia** opis przekroju różniczkowego, efekty są obserwowane w niektórych konfiguracjach kinematycznych
- **Znaczące efekty kulombowskie** – lokalnie bardzo silne, w szczególności dla par pp bliskich FSI!;
- Ogólny sukces teorii obejmujących 3NF (i kulombowskie), ale **bardzo lokalne problemy z opisem danych, rosnące wraz z energią** – połączenie 3NF i efektów relatywistycznych?;
- **Brak obliczeń** uwzględniających zarówno **3NF+Coulomb+podejście relatywistyczne**;
- Systematyczne badania nad energiami stanowią pole do testowania obecnych modeli i mogą być wykorzystane do dopasowania LEC ChEFT;

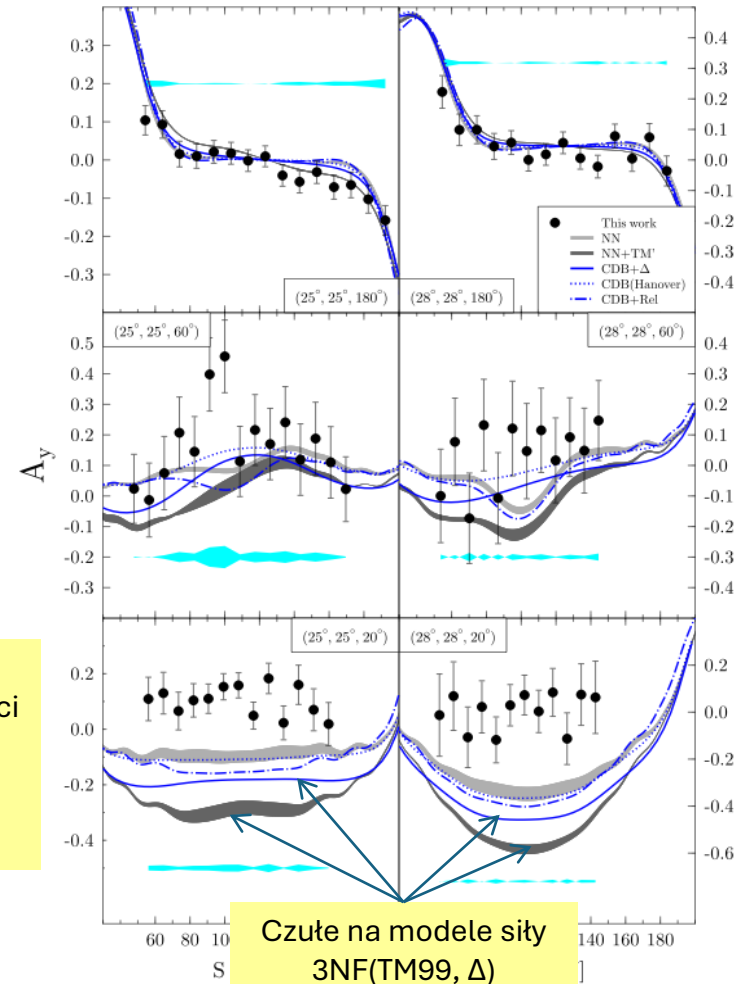
Układy 3N – Reakcja Breakup'u ${}^2\text{H}(\vec{p}, pp)n$

Wektorowe Zdolności Analizujące

135 MeV/nucleon



190 MeV/nucleon



Ogromne rozbieżności (nawet w odwrotną stronę)

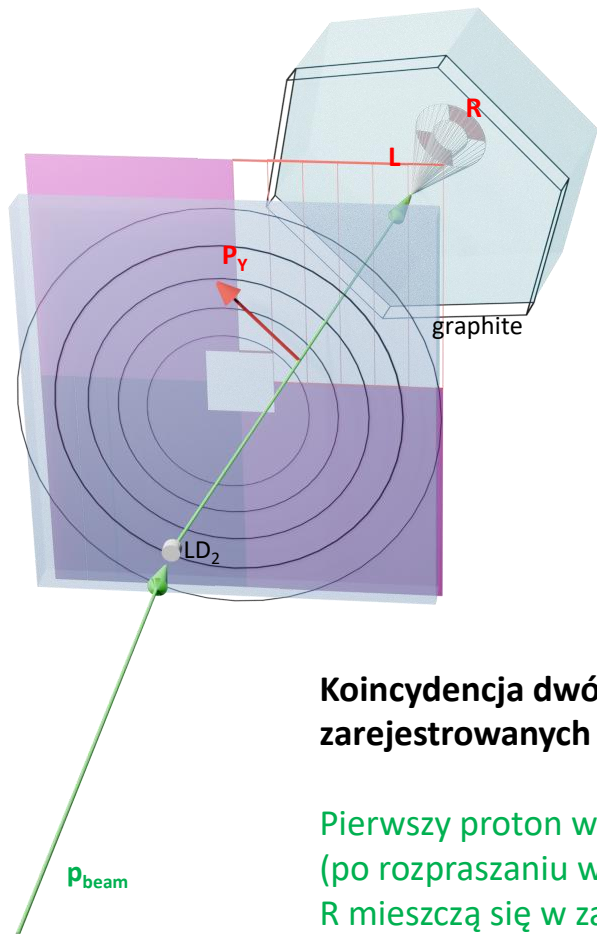
Czułe na modele siły 3NF(TM99, Δ)

BINA@KVI

Podsumowanie:

	Rozpraszanie sprężyste p-d	Breakup deuteronu p-d
3NF - wpływ na przekrój czynny	znaczny, potwierdzony problem dla energii >100 MeV	znaczny, potwierdzony ? (pojawiają się efekty relatywistyczne)
3NF - obserwable polaryzacyjne	Problemy (brak jednoznacznego potwierdzenia, czasem pogorszenie opisu)	
Coulomb - wpływ na przekrój czynny	praktycznie zaniedbywalny	istotny, blisko pp FSI dominujący, potwierdzony
efekty relatywistyczne	praktycznie zaniedbywalne	przewidywane znaczne, wymagają potwierdzenia eksperymentalnego

PROPOSAL: BINA wyposażona w polarymetr do pomiaru polaryzacji indukowanej

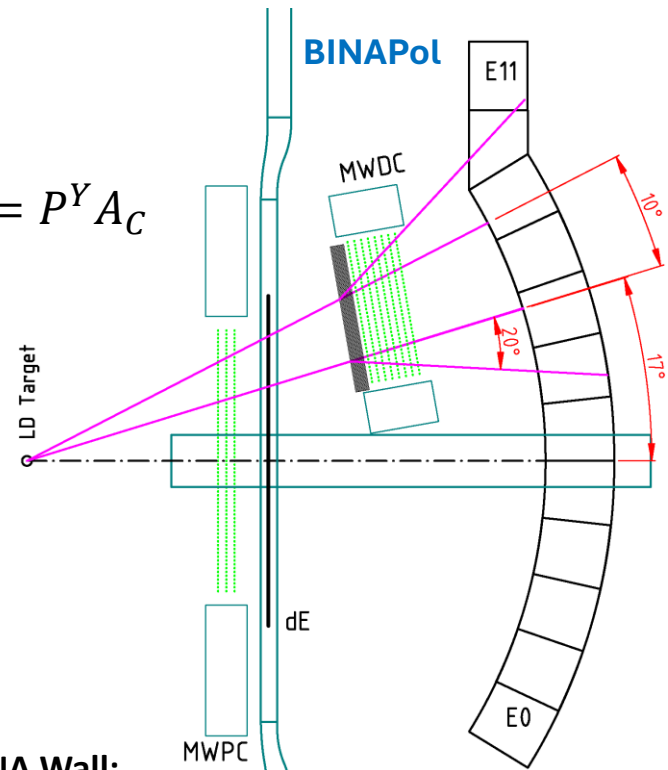


$$ASY = \frac{N_L - N_R}{N_L + N_R} = P^Y A_C$$

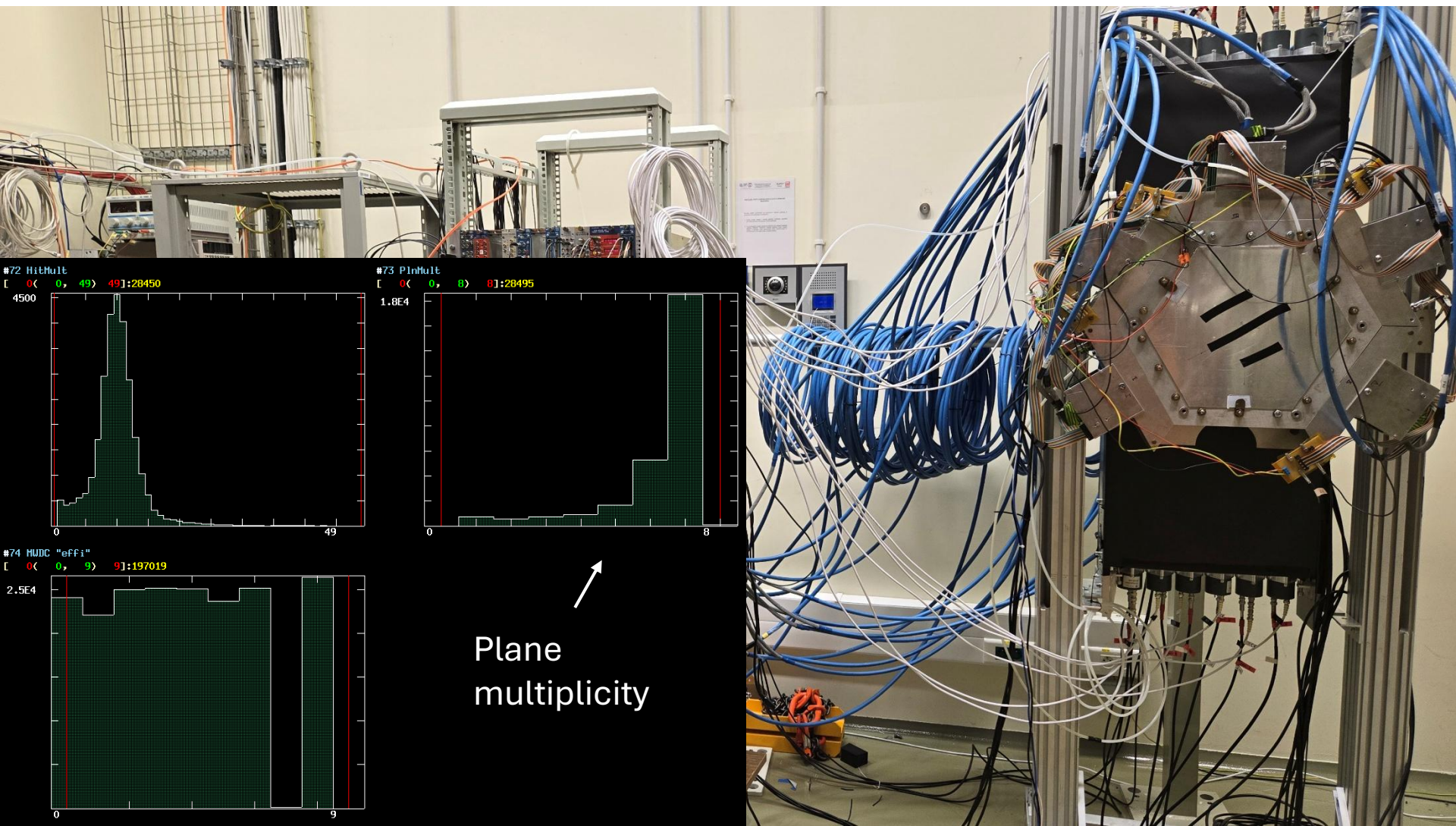
Koincydencja dwóch protonów zarejestrowanych w dwóch częściach BINA Wall:

Pierwszy proton w BINAPol
(po rozpraszaniu w pC, zarówno segmenty L, jak i R mieszczą się w zakresie akceptacji BINAPol)

drugi proton – w lewym dolnym sektorze



PROPOSAL: Polarimeter Tracker (MWDC) – testy



Dziękuję za uwagę!

